

Experimental Study of the Effects of Transmission Pipe Diameter on Water Hammer Pressure in Centrifugal Pump Systems

Made Suarda*, Ainul Ghurri, Made Sucipta dan Paul Pasing Saragih

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*Corresponding author: made.suarda@unud.ac.id

Abstract. A pump system consists of the main components of the pump unit and its piping. Therefore, the performance of centrifugal pumps is greatly influenced by pipeline design. In fluid flow systems the pipe diameter is the main parameter besides the nominal pressure and its material. The diameter of the pipe will determine velocity of fluid flow in the pipe, therefore, it affects the pressure of water hammer that occurs when the pump is shut down. For this reason, this research is conducting in a pump system model with variations of the transmission pipe diameter to get the velocities variation, which is equipped with a check-valve at the pump outlet. Fluid pressure in the pipeline is measured using the National Instrument acquisition data cDAQ 9171 with the NI 9205 module and a 5VDC 0-1.2MPa pressure sensor. While, the flow rate is measured with water flow sensor DN 32 mm and the Arduino UNO-R3 module. The experiment results show there is a close relationship between pumping discharge and the potential increase in water hammer pressure that take place. The design of the transmission pipe diameter of the pump system at a flow velocity of about 0.8 m/sec produces the best pumping discharge but on the contrary the effect of the water hammer pressure that occurs is also enormous.

Abstrak. Sistem pompa terdiri dari komponen utama unit pompa dan perpipaannya. Oleh sebab itu unjuk kerja pompa sentrifugal sangat dipengaruhi perencanaan perpipaannya. Dalam sistem aliran fluida diameter pipa merupakan parameter utama disamping tekanan nominal dan materialnya. Diameter pipa akan menentukan kecepatan aliran fluida di dalam pipa sehingga mempengaruhi tingginya tekanan *water hammer* yang terjadi saat pompa mati atau dimatikan. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan pengujian model sistem pompa dengan variasi diameter pipa transmisinya untuk mendapatkan variasi kecepatan, yang dilengkapi check-valve pada outlet pompa. Tekanan fluida dalam pipa diukur menggunakan data akuisisi National Instrumen cDAQ 9171 dengan module NI 9205 dilengkapi sensor tekanan 5VDC 0-1.2MPa, sedangkan debit alirannya diukur dengan water flow sensor DN 32 mm dan modul Arduino UNO-R3. Hasil pengujian menunjukkan terdapat keterkaitan erat antara debit pemompaan dan potensi peningkatan tekanan *water hammer* yang terjadi. Desain diameter pipa transmisi sistem pompa pada kecepatan aliran sekitar 0,8 m/dt menghasilkan debit pemompaan terbaik namun sebaliknya efek tekanan *water hammer* yang terjadi besar pula.

Kata kunci: sistem pompa, diameter pipa, *water hammer*, kecepatan aliran.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Sistem pompa adalah sebuah sistem yang terdiri dari unit pompa, sistem perpipaan dan panel kontrol. Oleh karena itu unjuk kerja pompa merupakan titik pertemuan antara kurva performansi pompa dan kurva instalasi sistem perpipaannya. Sehingga desain sistem perpipaan mempunyai efek sangat penting dalam operasi pompa. Sistem pompa tersebut akan beroperasi dengan performansi yang optimal jika ketiga komponen sistem pompa direncanakan dengan baik dan benar. Namun dalam aplikasinya, sering kali sistem perpipaan pompa tidak direncanakan dengan baik, sehingga sistem pompa tersebut tidak beroperasi pada titik kerja terbaiknya.

Water hammer merupakan peningkatan tekanan yang sangat cepat yang terjadi dalam penutupan aliran di dalam sistem perpipaan. Hal ini umumnya terjadi sebagai akibat penutupan katup secara tiba-tiba ataupun saat matinya pompa sehingga terjadi perubahan kecepatan aliran yang drastis [1]. Dalam aliran fluida, terjadinya *water hammer* kadang-kadang disebut 'surge' yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem pipa transmisi atau distribusi, kecuali sistem tersebut dilengkapi dengan pengaman anti *water hammer* yang memadai. Sebagai contoh, air vessel merupakan salah satunya alat anti *water hammer* yang digunakan dalam sistem pompa untuk melindungi sistem tersebut dari tekanan berlebih [2].

Fenomena *water hammer* ini umumnya terjadi di bagian *discharge* pompa pada saat pengoperasian dan kegagalan pompa pada saat beroperasi. Gelombang tekanan yang terlalu besar pada pipa dapat menyebabkan pipa rusak atau pecah. Peningkatan atau perubahan tekanan tersebut dihasilkan sebagai akibat energi kinetik perpindahan massa fluida dirubah menjadi energi tekanan. Hal ini akan berdampak buruk terhadap instalasi perpipaan terutama pipa sebagai jalur utama fluida dialirkan. Gelombang palu air ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran [3]. Semakin besar kecepatan aliran maka akan meningkatkan besarnya tekanan dan cepat rambat gelombang palu air.

Penelitian tentang analisis pengaruh panjang dan kekasaran pipa terhadap efek *water hammer* dan menyimpulkan bahwa semakin kasar pipa uji, efek *water hammer* semakin kecil dan semakin besar modulus elastisnya, semakin besar efek *water hammer* yang terjadi [4]. Selanjutnya investigasi *water hammer* model numeric pada sistem perpipaan dengan dua phase fluida menunjukkan bahwa tekanan puncak mengakibatkan tegangan tinggi pada pipa sehingga pipa tersebut harus ditahan untuk menghindari kerusakan. [5].

Persamaan dasar peningkatan tekanan akibat *water hammer* disebut persamaan Joukowsky, yaitu [6]:

$$\Delta P = \pm \rho a \Delta v \quad (1)$$

dimana ρ adalah massa jenis fluida, a adalah kecepatan gelombang suara dan v adalah kecepatan rata-rata penampang aliran yang besarnya dapat dihitung dengan persamaan:

$$v = \int_A u dA \quad (2)$$

dimana u adalah kecepatan longitudinal dan A merupakan luas penampang pipa.

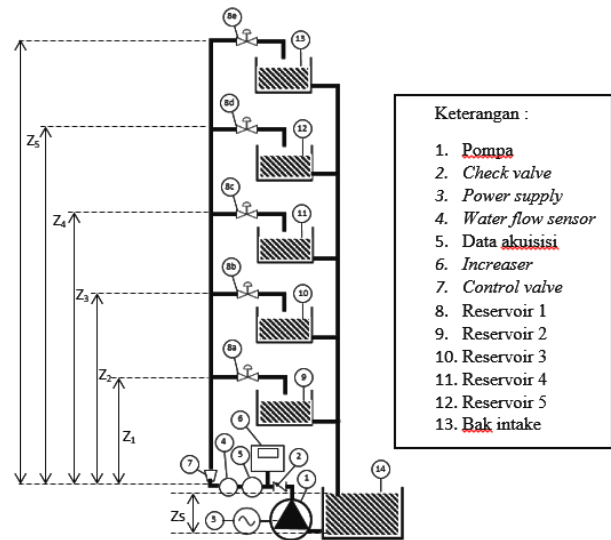
Secara umum peningkatan tekanan *water hammer* tergantung pada kecepatan aliran awal dan kecepatan gelombang tekanan sesuai dengan formula Joukowsky [7].

Diameter pipa transmisi merupakan salah satu hal yang perlu diperhatikan untuk mendesain sistem perpipaan pompa. Diameter pipa transmisi juga mempengaruhi karakteristik aliran dalam pipa. Beberapa literature menyarankan kecepatan aliran fluida dalam pipa sebesar 0,6 – 2,5 m/dt. Semakin besar diameter pipa transmisi, maka kecepatan aliran dan head losses semakin kecil. Namun massa air yang ada di dalam pipa transmisi akan semakin besar. Hal ini akan mempengaruhi besarnya gaya

tekan aliran balik pada saat pompa dimatikan. Oleh sebab itu perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh diameter pipa transmisi terhadap *water hammer* yang terjadi pada sistem pompa.

Metode Penelitian

Skema penelitian. Skema instalasi sistem pompa seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 1. Skema Model Tes Sistem Pompa

Variabel Penelitian. Variabel yang digunakan pada penelitian ini, yaitu variabel bebas (variasi diameter dan variasi tinggi pemompaan) dan variabel terikat (tekanan *water hammer*). Variabel bebas pada penelitian ini yaitu enam variasi diameter pipa transmisi untuk memvariasikan kecepatan aliran, yaitu pipa PVC diameter nominal ½ inchi, ¾ inchi, 1 inchi, 1¼ inchi, 1½ inchi dan 2 inchi. Selanjutnya terdapat lima variasi head ketinggian, yaitu 1 meter (Z1), 2 meter (Z2), 3 meter (Z3), 4 meter (Z4), dan 5 meter (Z5). Disamping itu variabel terikatnya adalah tekanan *water hammer* pada berbagai variasi kecepatan dan head pemompaan.

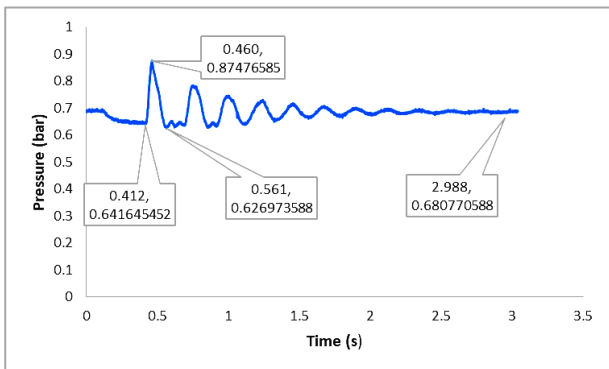
Peralatan Penelitian. Adapun alat yang digunakan dalam penelitian meliputi pompa air ($Q_{max} = 8450$ lt/jam, $H_{max} = 8$ m) digunakan untuk mensirkulasikan air menuju ke reservoir, pipa dan check-valve. Modul Arduino UNO R3 dilengkapi flow meter sensor DN 32 mm digunakan untuk mengukur debit. Data akuisisi National Instrumen cDAQ 9171 dengan module NI 9205 dan Pressure Transmitter DC 5V 0-1.2MPa digunakan untuk pengukuran tekanan *water hammer* yang terjadi di pipa sesaat setelah check valve.

Prosedur Pengujian. Pengujian pipa transmisi pada sistem pompa di laboratorium Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana. Pompa dioperasikan pada berbagai variasi diameter pipa

dan tinggi pemompaan. Pressure transmitter dan sensor aliran dipasang pada pipa outlet pompa. Data akuisisi tekanan dikalibrasi pada tekanan ukur nol dan tekanan maksimum 12 bar, sedangkan flow meter dikalibrasi menggunakan gelas ukur.

Hasil dan Pembahasan

Adapun salah satu contoh data hasil pengujian fenomena *water hammer* yang terjadi dalam pipa transmisi berdiameter nominal 1/2 inchi (diameter dalam 22 mm) pada ketinggian pemompaan 5 meter adalah seperti pada Gambar 2. Tekanan maksimum dan peningkatan tekanan serta periode rambatan gelombang tekanan *water hammer* yang terjadi dapat diidentifikasi dari data akuisisi.



Gambar 2. Tekanan maksimum *water hammer*

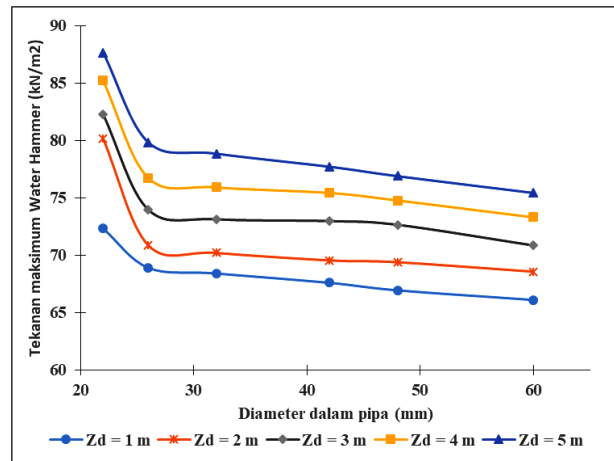
Dari seluruh data pengujian yang didapat dari data akuisisi, tekanan maksimum dan peningkatan tekanan *water hammer* serta periode rambatan gelombang tekanan sejak awal terjadinya *water hammer* hingga tekanan stabil kembali dapat diinvestigasi dan ditabulasi. Tabel 1 menunjukkan peningkatan tekanan *water hammer* yang terjadi pada variasi diameter pipa dan tinggi pemompaan. Variasi kecepatan dilakukan dengan variasi diameter pipa transmisi karena kesulitan dalam mengontrol kecepatan aliran pada kecepatan tertentu yang diinginkan.

Tabel 1. Tekanan dan periode rambatan *water hammer*

Diameter Dalam Pipa (mm)	Peningkatan Tekanan Water Hammer (N/m ²)				
	Head Geodetik Pemompaan, Zd (m)				
	1	2	3	4	5
22	8.48	17.44	18.10	21.03	23.48
26	5.05	6.68	9.13	12.23	14.83
32	4.73	5.87	8.31	10.92	13.04
42	3.59	5.87	8.80	10.92	11.90
48	3.26	5.38	8.31	9.46	11.09
60	2.42	4.56	6.03	8.31	9.94

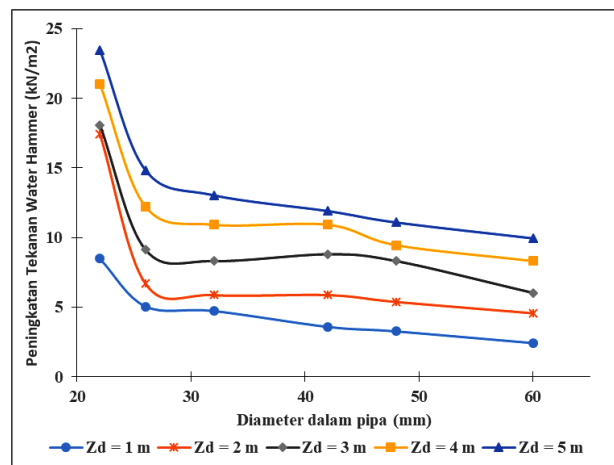
Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar diameter dalam pipa (semakin kecil kecepatan aliran) cenderung semakin kecil tekanan maksimum gelombang tekanan *water hammer* yang terjadi. Disamping itu, semakin tinggi head geodetik

pemompaan semakin besar tekanan maksimum *water hammer* yang dihasilkan.



Gambar 3. Tekanan maksimum *water hammer*

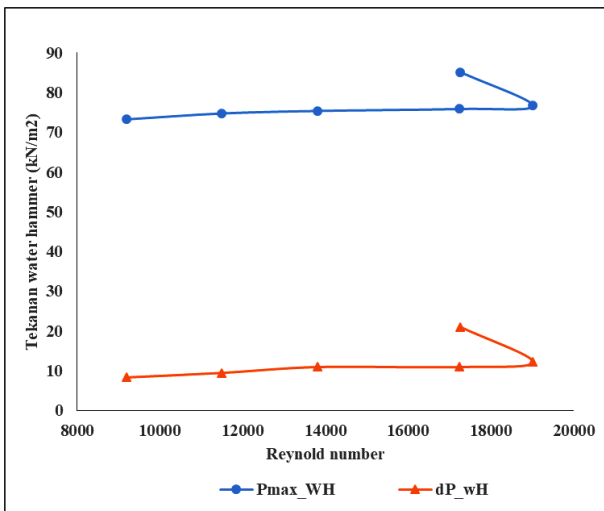
Hal serupa terjadi pada peningkatan tekanan *water hammer* yang terjadi, seperti pada Gambar 4. Semakin besar kecepatan aliran (dengan semakin kecil diameter pipa) dan semakin tinggi head pemompaan maka semakin besar peningkatan tekanan (*surge*) yang terjadi. Hal tersebut sesuai dengan persamaan Joukowsky (Pers. 1) bahwa peningkatan tekanan *water hammer* sebanding dengan perubahan kecepatan dalam pipa saat penutupan *check-valve* akibat operasi pompa dimatikan (Off). Demikian pula, semakin tinggi head pemompaan dengan semakin panjangnya pipa transmisi maka semakin besar massa air yang ada di dalam pipa sehingga perubahan momentum yang dihasilkan juga semakin besar, sebagai akibatnya *surge* tekanan yang terjadi juga semakin besar.



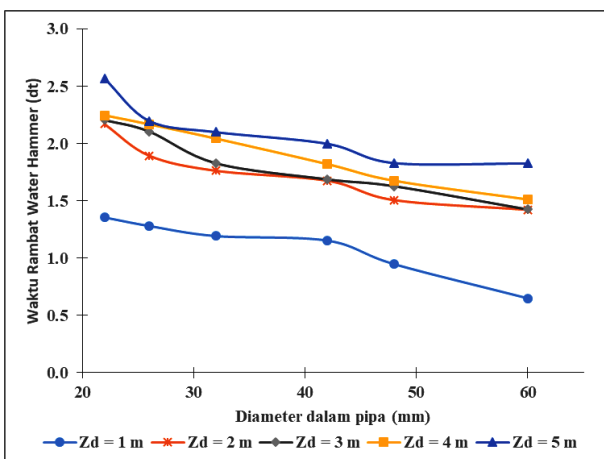
Gambar 4. Peningkatan tekanan *water hammer*

Namun perlu diperhatikan bahwa tidak mutlak diameter pipa yang lebih besar menghasilkan perubahan tekanan *water hammer* yang lebih kecil, karena dengan semakin besar diameter pipa menghasilkan perubahan momentum yang makin besar sebagai akibat massa air yang

lebih besar. Kedua parameter tersebut, kecepatan aliran dan diameter pipa, dapat diwakilkan dengan bilangan Reynolds. Secara umum, semakin besar bilangan Reynolds aliran fluida semakin besar perubahan tekanan *water hammer* yang dihasilkan. Gambar 5 menggambarkan tekanan *water hammer* yang terjadi pada kondisi pengujian pada ketinggian pemompaan 4 meter dengan variasi diameter pipa transmisi. Dimana pada diameter pipa tertentu menghasilkan debit (kecepatan) aliran pemompaan yang paling besar, sehingga pada angka Reynolds tersebut mengakibatkan tekanan *water hammer* yang paling besar pula. Jadi dari data hasil pengujian dapat diinvestigasi bahwa pada kecepatan aliran pemompaan sekitar 0,6 m/dt menghasilkan debit pemompaan yang paling besar sehingga berpotensi mengakibatkan tekanan water yang paling tinggi pula.



Gambar 5. Tekanan *water hammer*

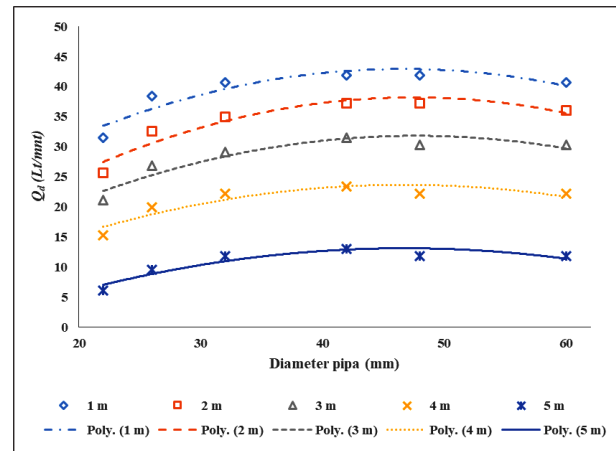


Gambar 6. Periode rambatan *water hammer*

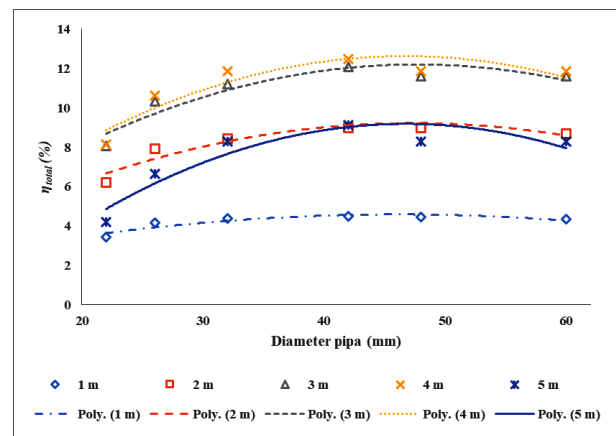
Sejalan dengan besarnya tekanan *water hammer* yang terjadi, semakin besar kecepatan (diameter pipa lebih kecil) dan semakin tinggi head pemompaan mengakibatkan periode waktu rambatan gelombang *surge* tekanan juga

semakin lama. Semakin tinggi peningkatan tekanan *water hammer* yang terjadi semakin lama rambatan gelombang tekanannya pula.

Diameter pipa transmisi juga mempengaruhi unjuk kerja sistem pompa meliputi debit pemompaan dan efisiensi total seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8. Secara umum semakin besar diameter pipa transmisi semakin tinggi unjuk kerja (debit dan efisiensi) sistem pompa. Namun dapat direkomendasikan unjuk kerja terbaiknya jika menggunakan diameter pipa sekitar 42 dan 48 mm, yaitu pada kecepatan aliran air 0,8 m/dt.

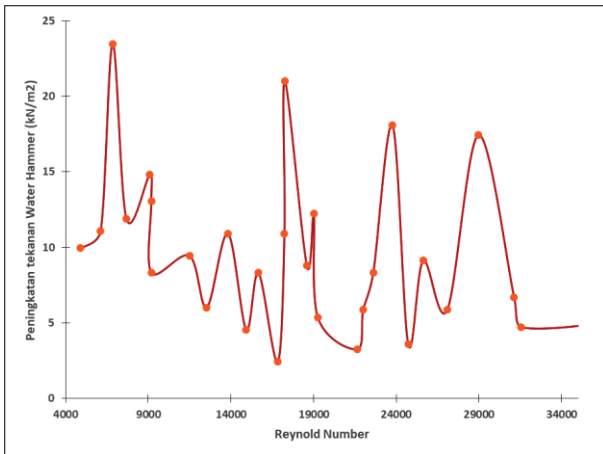


Gambar 7. Debit pemompaan



Gambar 8. Efisiensi total sistem pompa

Diameter pipa dan kecepatan aliran merupakan parameter dari persamaan *Reynold Number*. Jika dari data hasil pengujian peningkatan tekanan diplotkan terhadap angka Reynold, seperti pada Gambar 9, terlihat bahwa tidak terjadi korelasi yang linear atau teratur. Mengingat antara diameter pipa dan kecepatan mempunyai terbalik. Disamping itu tekanan *water hammer* dipengaruhi oleh massa air (momentum) yang terjadi di dalam pipa saat pompa mati atau di-OFF-kan.



Gambar 9. Efisiensi total sistem pompa

Jadi, dalam perencanaan perpipaan sistem pompa sangat penting merencanakan diameter pipa berdasarkan kecepatan aliran dalam pipa tersebut guna menghasilkan unjuk kerja pompa yang optimal, disamping parameter lainnya seperti material dan *pressure nominal* pipa tersebut.

Kesimpulan

Perubahan tekanan *water hammer* sangat terkait dengan unjuk kerja sistem pompa, terutama debit aliran dan efisiensi yang dihasilkan. Unjuk kerja yang tinggi sebaliknya berpotensi mengakibatkan peningkatan tekanan *water hammer* yang terjadi sebagai akibat perubahan momentum yang besar pula saat operasi pompa disetop atau mati. Untuk itu sistem pompa tersebut membutuhkan perlengkapan pencegah *water hammer* yang memadai.

Penghargaan

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Universitas Udayana yang telah mendukung dalam keikutsertaan penulis dalam seminar SNTTM 2019 ini.

Referensi

- [1] Bloch H.P., 2017. Water Hammer. Handbook of Valves and Actuators, Science Direct.
- [2] Stephenson D., 2002. Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 8, August 1, 2002, pp. 792–797.
- [3] Bochari, Joleha, Nurdin dan Amril. Fenomena Palu Air (Water Hammer) Menggunakan Pendekatan Model Fisik. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru 28293.

- [4] Amri A., 2010. Analisis Pengaruh Panjang Dan Kekasaran Pipa Terhadap Efek Water Hammer. Jurnal Teknik Mesin Vol. 12 no. 1.
- [5] Bogoi A., *at al.*, 2013. Front Wave Prediction in Water Hammer Phenomena involving Two Phase Flows, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE13), November 15-21, San Diego, California, USA.
- [6] Ghidaoui M.S., *at.al*, 2005. A Review of Water Hammer Theory and Practice, ASME, Applied Mechanics Reviews, January 2005, Vol. 58, pp. 49-76.
- [7] Vestnik S., 2014. Valve-Induced Water Hammer and Column Separation in a Pipeline Apparatus, Journal of Mechanical Engineering 60(2014)11, pp. 742-754.